

JAERI-Research

JP0250512

2002-021



溶融シリコンの水蒸気爆発に関する研究

2002年11月

森山 清史・丸山 結・中村 秀夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

溶融シリコンの水蒸気爆発に関する研究

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部

森山 清史・丸山 結※・中村 秀夫

(2002年8月29日受理)

シリコンは軽水炉の炉心構成材のひとつであるジルコニウムと同様に酸化し易い材料であり、また、半導体産業で溶融物を取り扱うことから、その水蒸気爆発挙動に関心がもたれている。本研究は、シリコン溶融物の水蒸気爆発挙動を実験によって明らかにし、さらに、水蒸気爆発における酸化反応の影響に関する検討を行ったものである。実験は、水プール中へ4kgのシリコン溶融物を落下させる体系で、シリコンの初期温度を変えて2回行った。2回の実験とともに大規模な自発的水蒸気爆発が発生した。トリガリングは溶融物が水槽の底に到達した際に生じた。水中で計測された圧力ピークは4~15MPa、エネルギー変換率は4~10%程度だった。水蒸気爆発の結果得られたデブリの粒径分布は、これまでに行った鉄-アルミナテルミット溶融物を用いた実験と比較して非常に細かく、質量中央径は65及び85μmであった。デブリ粒径とエネルギー変換率の相関を、これまでに行ったテルミット溶融物の実験データも含めて検討し、デブリ粒径が小さいほどエネルギー変換率が大きいという傾向の一貫性が認められた。酸化反応については、デブリの表面分析により、最大で厚さ5μm程度の酸化膜が認められた。これは質量割合で数%のシリコンが酸化した可能性を示すものである。

Study on Steam Explosions with Molten Silicon

Kiyofumi MORIYAMA, Yu MARUYAMA[※] and Hideo NAKAMURA

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 29, 2002)

Silicon is a material which is easily oxidized like zirconium that is one of LWR core materials. Also, its behavior in terms of steam explosions is a concern in semiconductor industries where silicon melt is handled. In this work, characteristics of steam explosions with silicon melt, as well as the influence of oxidation reaction in steam explosions were investigated. Two cases of experiments were performed with 4kg of molten silicon dropped into a water pool, changing the initial melt temperature as a parameter. Both of 2 experiments produced strong spontaneous steam explosions triggered when the melt reached the bottom of the water vessel. The pressure peaks measured under water and energy conversion ratios ranged 4~15 MPa and 4~10%, respectively. The melt was fragmented far more finely compared with previous experiments with iron-alumina thermite melt. The mass median diameter of the debris was 65~85 μm . Correlation between the debris diameter and energy conversion ratio showed a consistent trend that the smaller the debris diameter the larger the energy conversion ratio. Regarding the oxidation reaction, analysis of the debris detected a surface oxide layer of maximum about 5 μm thick. It implies a possibility that several percent of the silicon mass was oxidized.

Keywords: Severe Accident, FCI, Steam Explosion, Thermal Interaction, Molten Silicon, Melt Drop, Energy Conversion Ratio, Debris Analysis

[※] On loan to Nuclear Power Engineering Corporation

目 次

1	緒 言	1
	1.1 水蒸気爆発の現象論	1
	1.2 酸化反応を伴う水蒸気爆発	2
	1.3 本研究の目的	3
2	実験方法	4
	2.1 装置及び方法	4
	2.2 実験条件	6
3	実験結果	8
	3.1 SSE6	8
	3.2 SSE7	8
	3.3 エネルギー変換率	18
	3.4 デブリ粒径分布	23
	3.5 酸化反応の影響	26
4	結 言	34
	謝 辞	34
	参考文献	35

Contents

1	Introduction	1
1.1	Phenomenology of Steam Explosions	1
1.2	Steam Explosions with Oxidation Reaction	2
1.3	Purpose of the Present Study	3
2	Experimental Method	4
2.1	Facility and Method	4
2.2	Experimental Conditions	6
3	Results	8
3.1	SSE6	8
3.2	SSE7	8
3.3	Energy Conversion Ratio	18
3.4	Debris Size Distribution	23
3.5	Oxidation Reaction	26
4	Conclusions	34
Acknowledgements		34
References		35

1 緒言

1.1 水蒸気爆発の現象論

蒸気爆発は、高温の液体と相対的に低温で高揮発性の液体とが接触した場合に生じ得る極めて高速な現象で、一連の過程で高温液体の保有する熱エネルギーの一部が機械的なエネルギーに変換される。ここで低温液体が水の場合、水蒸気爆発と呼ばれる。水蒸気爆発は粗混合、トリガリング、伝播及び膨張の4過程からなることが知られている。それぞれの過程を以下に説明する。また、原研の事故時格納容器挙動試験（ALPHA）計画で実施した、温度約2700Kのテルミット溶融物（アルミナと鉄の混合溶融物）を水中に落下させた実験で観測された水蒸気爆発（約5000フレーム／秒の高速度撮影）[1, 2]と各過程の概念を図1.1に示す。

1. **粗混合 (Premixing):** 高温溶融物と水が比較的ゆっくり(0.1～数秒)混合し、粗く(数mm)分裂した高温溶融物の液滴が水蒸気膜に覆われた状態で水と混合した粗混合領域を形成する。
2. **トリガリング (Triggering):** 溶融物液滴を覆う水蒸気膜が崩壊する等により局所的に圧力波が生じる。
3. **伝播 (Propagation):** トリガリングにより生じた圧力波が成長し、衝撃波となって粗混合領域内を伝播する。衝撃波の通過により溶融物液滴がさらに細粒化(数十μm)し、伝熱面積が急激に増大するため、熱伝達の促進によって衝撃波の伝播が維持される。この過程は圧力伝播に支配されるため、非常に高速である(数ms)。
4. **膨張 (Expansion):** 衝撃波伝播後に形成される高圧領域が膨張し、周囲の構造物を破損する等の仕事が生じる。

この4段階のうち伝播過程においては、「衝撃波による高温液滴の細粒化」→「表面積増大による熱伝達の促進」→「衝撃波の成長と伝播」のように、細粒化という機械的な作用と伝熱・相変化という熱的な作用のポジティブ・フィードバックが働いており、これが現象の爆発的様相の原因であると同時に「衝撃波」と「細粒化」というこの現象の特徴と密接に関連している。言い替えれば、ある現象が水蒸気爆発であるかどうかを判断する上で、衝撃波あるいは強い圧力パルスが見られること、高温液体の著しい細粒化が見られることが必要条件となる。

原子力発電プラントの安全性研究では、シビアアクシデント（設計基準事故を越える事故で燃料の溶融が生じる）の評価に関連して、炉心溶融物と冷却材の接触による水蒸気爆発の研究がこれまでに数多く実施してきた[3, 4, 5, 6]。

一般の産業界でも、製鉄・金属工業、製紙パルプ工業等の業種で高温の溶融物による蒸気爆発事故例が報告されている[7]。また、半導体用シリコン単結晶の製造工程でも、溶融シリコンと容器冷却水の接触による水蒸気爆発が懸念されている。

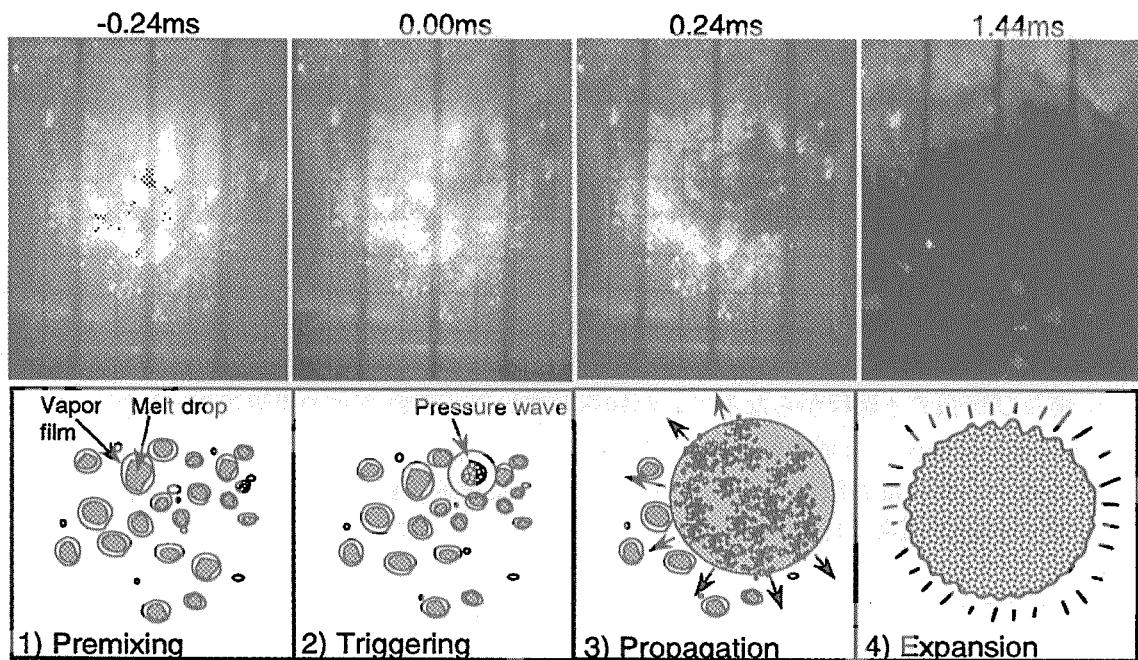


図 1.1: 水蒸気爆発の 4 段階の過程

1.2 酸化反応を伴う水蒸気爆発

水蒸気爆発は基本的に熱的な相互作用であるが、高温液体の化学的活性が高い場合は、水蒸気爆発の過程で化学反応が発生し、その反応熱や気体発生により水蒸気爆発の規模が増大する場合がある。

原子炉のシビアアクシデントでは、燃料棒の被覆管に含まれるジルコニウムが炉心溶融物に未酸化の状態で含まれる場合、水蒸気爆発時に酸化反応が起り、爆発の規模が増大する可能性がある。

酸化反応を起こす金属溶融物を用いた水蒸気爆発実験は、Nelson ら [8](アルミニウム)、Cho ら [9, 10](アルミニウム、ジルコニウム)により行われている。アルミニウム又はジルコニウムを用いた実験では、外部から圧力パルスによって強制的にトリガリングを与えた場合に水蒸気爆発が発生したという報告が多く、自発的水蒸気爆発は 20kg 以上の溶融アルミニウムを水プールに投下した場合の例のみである [9]。水蒸気爆発が発生した場合の酸化の程度は、アルミニウムの場合 30~40%、ジルコニウムの場合は飽和温度の水に投下した場合に 90% 程度、サブクール水では 50% 程度 [10] との報告がある。通常、金属の酸化反応により解放される化学エネルギーは顯熱及び潜熱として保有するエネルギーと比較して 1 オーダー大きいため、化学変化が水蒸気爆発のタイムスケール内で進行すると、機械的エネルギーの放出は顕著に増大する。

半導体材料として利用されるシリコンも化学的活性は高く、水蒸気爆発が発生した場合には併せて酸化反応が起こることが予想されるが、これに関する実験はこれまでに行われていない。

表 1.1 にシリコンの物性を、これまでに原研での実験に用いた実績のあるテルミット溶融物及び、Nelson ら [8]、Cho ら [9, 10] 他の実験で使用されたアルミニウム及びジルコニウムと比較して示す。

シリコンは、密度が小さく比熱が大きい点、また水蒸気と反応して酸化する場合の反応熱の大きさにおいてアルミニウムに似ている。特徴的なのは融解潜熱が非常に大きい点である。融点はアルミニウムとジルコニウムの間にある。表面固化の観点からは、潜熱が大きいと初期過熱度(初

表 1.1: 溶融物物性の比較

	テルミット (鉄・アルミナ混合物)	ジルコニウム	アルミニウム	シリコン
融点 (K)	2300(アルミナ)	2125	934	1685
密度 (kg/m ³)	3600 [約 2700K]	6300 [1000K,S]	2300 [1100K]	2500 [MP]
熱伝導率 (W/mK)		24 [1000K,S]	123 [1100K]	67 [MP]
粘性係数 (Pa·s)	-	-	1.2×10^{-3} [1100K]	0.88×10^{-3} [MP]
表面張力 (N/m)	-	-	0.86 [1100K]	0.7-0.9 [MP]
比熱 (J/kgK)	約 1000(潜熱含む) [373-2700K 平均]	350 [1000K,S]	1100 [1100K]	1037 [MP]
潜熱 (J/kg)	-	25×10^3	395×10^3	1105×10^3
初期温度 (K)	2700	2325	1200	1740-1890
保有熱量 (MJ/kg) ¹⁾	2.30	0.708	1.29	2.52-2.68
反応熱 (MJ/kg) ²⁾	-	6.8	17.6	15.2
水素発生量 (H ₂ kg/M kg)	-	0.0438	0.111	0.142
体積 (m ³ at 300K 0.1MPa)	-	0.54	1.36	1.75

温度依存の物性について[]内の数値はその温度、MPは融点における値であることを示し、Sは固体の値であることを示す。

- 1) 保有熱量は、大気圧における水の飽和温度 373K を基準温度として算出した。
- 2) 反応熱は $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ 、 $Al + 3/2H_2O \rightarrow 1/2Al_2O_3 + 3/2H_2$ 、 $Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2$ に基づき金属 1kgあたり熱量を求めた。水素生成量も同様。なお、標準生成エンタルピーのデータは文献 [11] による。

期温度 - 融点) が小さい場合でも表面の固化が起こりにくく、水蒸気爆発が発生し易いと考えられる。ただし融点はアルミニウムより高いため、膜沸騰安定性の観点からは、アルミニウムより水蒸気爆発を起こしにくい。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、シリコンの水蒸気爆発に関わる特性を明らかにするとともに、水蒸気爆発における酸化反応の影響についての知見を得ることである。

シリコンは、前述のように軽水炉のシビアアクシデント時の水蒸気爆発で酸化反応が問題となるジルコニウムと同様に酸化されやすい性質をもち、また、融点が低いので実験上の取扱いが容易である利点がある。そこで、溶融シリコンを用いて水蒸気爆発実験を実施し、圧力パルス、細粒化の程度、熱から機械的エネルギーへの変換率、及び酸化反応に関する測定を行った。

なお、溶融物と水の接触形態には水中への溶融物落下、溶融物上への注水等、いくつかの形態があるが、本研究では大規模な水蒸気爆発が起こり易い、水中への溶融物落下の場合について実験を行った。

2 実験方法

2.1 装置及び方法

実験装置の概要を図2.1に示す。本実験では、ALPHA装置[12]の高周波誘導加熱式溶融装置を用いてシリコンを溶融し、溶融物をALPHA容器内に設置した水槽に投下し、そこで生じた水蒸気爆発による水中及び気相中の圧力パルス、気相中の温度変化を記録するとともに、高速度カメラ等による現象の撮影を行った。

シリコンを溶融するためのるっぽはグラファイト製で、内径180mm、深さ350mm、底面に直径100mmの孔を設けてある。この孔はグラファイト製の栓で塞がれ、溶融物を落下させる時にこの栓を窒素ガスで駆動されるアクチュエータにより引き抜く。るっぽの厚さは、高周波加熱の効率を考慮して40mmとした。

シリコンを溶融する際には、シリコン及びグラファイトの酸化を防止するため、隔離弁によって溶融装置をALPHA容器から遮断し、溶融装置内を窒素で、るっぽの内部をアルゴンで置換した。

溶融シリコンの温度測定にはBタイプ熱電対(白金ロジウム-白金ロジウム)を石英ガラス製の保護管に入れたものを2本用いた。

水槽はSSE6実験ではステンレス製フレームにポリカーボネート板をとりつけた高さ1.2m、奥行き及び幅0.84m(内寸)のものを、SSE7実験ではアクリル製の高さ1.1m、奥行き及び幅0.68m(内寸)のものを用いた。水位はいずれも0.9mとした。水槽の底もポリカーボネート又はアクリル製であるため、溶融物が底に達した時の熱による損傷を防ぐため、厚さ2mmのステンレス板を敷いた。 SSE6、SSE7両実験に用いた水槽とその周囲の実験前のセットアップを図2.2に示す。水槽の右側に張られた半透明のプラスチックフィルムは、光源からの光を拡散してバックライトを得るためにものである。また、手前に垂直に張られたワイヤーは後述する雰囲気中の熱電対を固定するものである。

水槽内の現象を観察するために、高速度ビデオ(500フレーム/秒、NAC製HSV-1000)、デジタルビデオ(60フィールド/秒、パナソニック製NV-C5)及び16mmフィルム高速度カメラ(3000~5000フレーム/秒、NAC製E-10)を使用した。

水槽内の圧力計測にはピエゾ式水中センサ(PCB製138A)、水槽壁面での圧力測定にピエゾ式センサ(PCB製113A22)、雰囲気中の圧力測定にピエゾ式(PCB製113A21)および歪みゲージ式(共和電業製PGM-5KC)を使用した。各々の圧力センサの応答周波数は、ピエゾ式は500kHz、歪みゲージ式は34kHzである。

水中の温度測定にはΦ1.6mmのKタイプ熱電対(クロメル-アルメル)、雰囲気中の温度測定には応答速度の早い極細シーズ(Φ0.25mm)のKタイプ熱電対を使用した。極細シーズ熱電対の応答時定数は10ms程度である。

主な計測項目を表2.1にまとめて示す。これらはデータレコーダ(NEC製RT-2434)に、サンプリング周期10μsで2.88秒間記録した。

データレコーダ及び16mm高速度カメラのタイミング制御は、溶融物投下時にるっぽの栓を引き抜く窒素ガス作動アクチュエータの作動信号を用いて行った。データレコーダに対しては、る

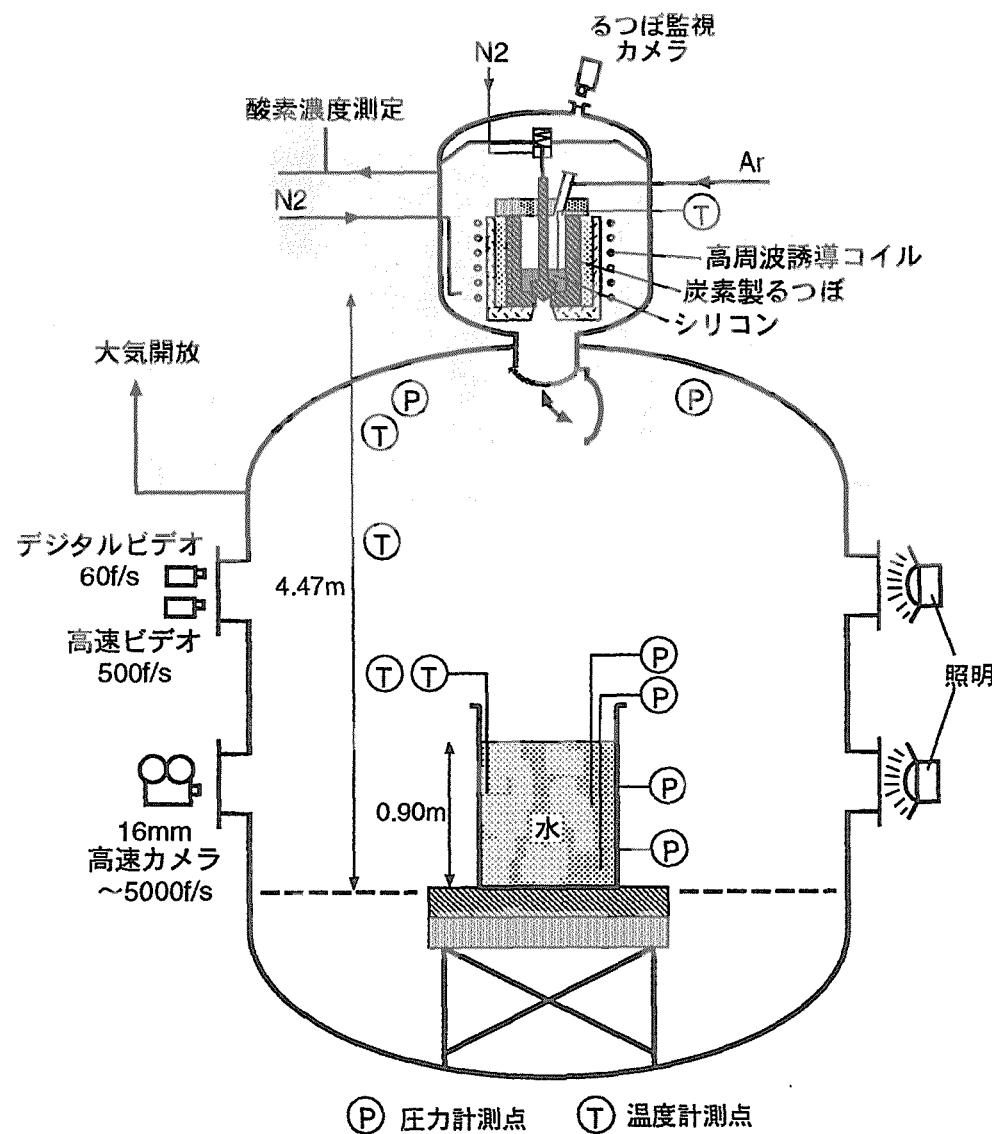


図 2.1: 溶融シリコン水中投下時の水蒸気爆発実験における装置概要

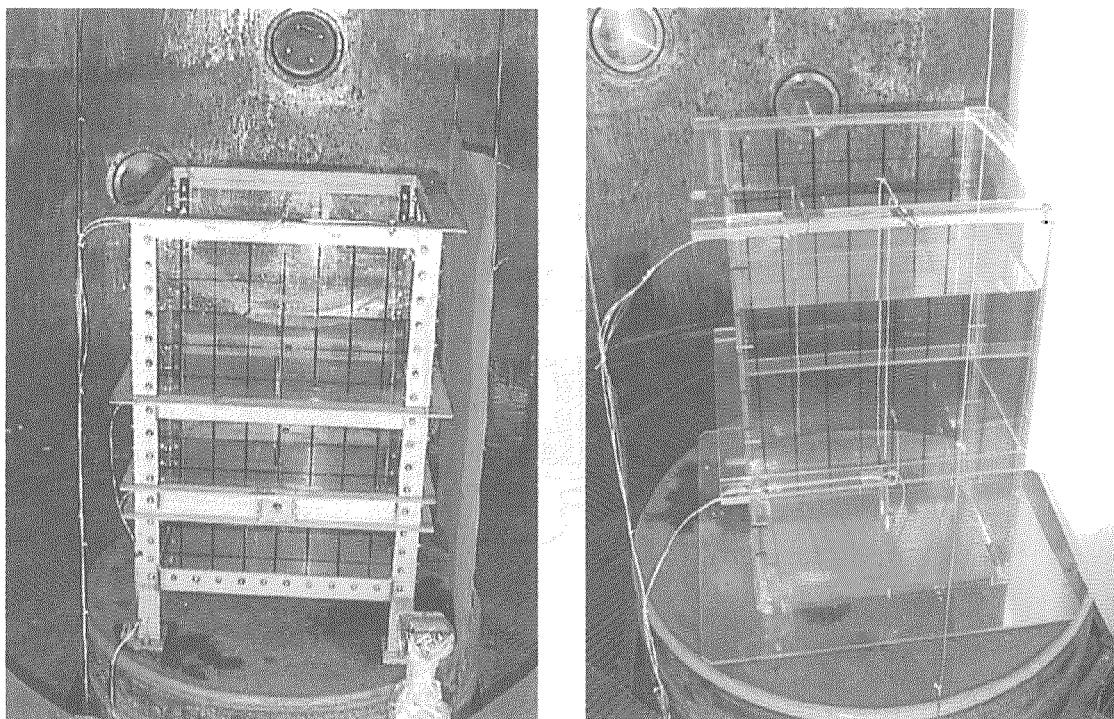


図 2.2: SSE6(左) 及び SSE7(右) における実験前の水槽付近のセットアップ

つばの栓が開かれてから溶融物が水面に到達するまでの自由落下時間を考慮し、アクチュエータ作動信号を約1秒間の遅延回路を通して与えた。高速度カメラについては、フィルム走行速度が所定の値(2000または4000フレーム/秒)に達するまでに0.4~0.8秒かかるなどを考慮し、アクチュエータの作動信号をそのまま与えた。なお、撮影された画像データと、データレコーダの記録との同期をとるため、データレコーダの記録開始時に写真用フラッシュを発光させ、画像に記録した。

2.2 実験条件

2回の実験を行い、各々SSE6、SSE7と称することにした。実験条件を表2.2にまとめて記す。パラメータとして溶融物の初期温度を変え、融点からの過熱度が大(約200K)及び小(約50K)の条件とした。初期温度の実測値はSSE6実験で1880K、SSE7実験では1730Kである。

表 2.1: SSE6 及び SSE7 の主な計測項目

場所	測定項目	センサ及び点数
つば	溶融物温度	B 熱電対 2点
水プール	圧力(水中)	ピエゾ式水中型 2点(高さ底から300mm、中心から200、300mm)
	圧力(壁面)	ピエゾ式壁面型 2点(高さ底から300、600mm)
雰囲気	圧力	ピエゾ式 1点(ALPHA容器天井)
	温度	歪みゲージ式 1点(ALPHA容器天井) K 熱電対(Φ 0.25mm) 高さ方向に3点

表 2.2: SSE6 及び SSE7 の実験条件

実験番号		SSE6	SSE7
溶融物		シリコン	
温度		1880 K (過熱度 195K)	1730 K (過熱度 45K)
質量		4 kg (約 $1.6 \times 10^{-3} \text{m}^3$)	
水プール		寸法 0.84×0.84×1.2m	0.68×0.68×1.1m
水位		0.90m	
水温		291 K	295 K
格納容器		雰囲気 空気	
圧力		大気圧	
温度		295 K	297 K

本実験に用いた ALPHA 装置では、これまでにテルミット溶融物 20kg を水中に投下して水蒸気爆発を発生させる実験の経験がある。実験に使用するシリコン溶融物の質量を決めるにあたり、安全を考慮して、実績のあるテルミット溶融物 20kg と保有エネルギーが同等となるようにした。

ただし、シリコンはテルミット溶融物と異なり、水中で酸化反応を起こすと考えられる。アルミニウムやジルコニウム溶融物を用いた Cho らの実験 [9, 10] では、サブクール水中で水蒸気爆発が発生した場合、アルミニウムでは全溶融物の 100%近く、ジルコニウムでは 50%程度が酸化されたと報告されている。シリコンはこれらの金属と比較すると酸化されにくいため、ここではシリコン溶融物の 50%が酸化された場合を想定し、化学反応熱を含めた保有熱エネルギーが、テルミット溶融物の実験と同等となるようにした。

表 1.1 に示したように、シリコン 1kgあたりの顯熱及び潜熱保有量の合計は、初期過熱度 50~200K の範囲で約 2.6MJ となる(この程度の初期過熱度の差は大きく影響しない)。50%の反応熱 7.6MJ を加えると約 10MJ/kg となる。テルミット溶融物の場合の保有熱量は 2.3MJ/kg だから、同質量の場合シリコン溶融物はテルミット溶融物の 4 倍強のエネルギーを放出することになる。テルミット溶融物 20kg 相当を超えないことを条件として、本実験ではシリコン 4kg を用いることにした。

50%酸化の仮定で、シリコン溶融物 4kg の発生熱量は 41MJ であり、これは水 630kg($0.84 \times 0.84 \times 0.9\text{m}$ の水槽の場合)の温度を約 16 °C 上昇させるか、あるいは、室温 (293K) の水約 16kg を 373K の水蒸気(大気圧で体積約 30m^3)にする熱量である。実際には両者の間の現象となるはずであり、最大で ALPHA 容器の容積 (50m^3) の半分以上の水蒸気が発生することになる。容器は気密ではないため、これまでに実施した実験では、水蒸気爆発後に容器から多量の水蒸気が排気されている。本実験でも同様の様相となることが予想された。また、水との酸化還元反応で発生する水素は 0.28kg であり、これは大気圧室温で 3.4m^3 となる。この非凝縮性ガスについては、ALPHA 容器の容積 50m^3 と比較して大きくない。

水温は自発的水蒸気爆発が発生しやすいサブクールの大きい条件とし、室温にした。

3 実験結果

SSE6、SSE7 の両ケースとともに、自発的水蒸気爆発が発生した。以下に、各々の結果について詳述する。

3.1 SSE6

デジタルビデオにより撮影した画像を図 3.1 に示す。写真に見られるグリッドは、水槽の壁面に寸法を示すために描いたもので、間隔は 100mm である。溶融物は液柱状で水中に入り、直径 150mm 程度の粗混合領域を形成しながら沈降した。水面上昇は約 17mm だった。溶融物が沈降して、水槽の底に到達した時に自発的トリガリングが生じ、衝撃波及び相互作用領域が上方に伝播した。この水蒸気爆発により、水槽のステンレス製フレームは大きく変形し、2箇所が破断した。ポリカーボネート板は破損して飛散した。(図 3.14 参照)

以下に示す圧力データを取得したセンサー類の詳細な位置を、図 3.2 に示す。

図 3.3 及び 3.4 に、水中に吊下げたピエゾ式圧力センサー、図 3.5 及び 3.6 に水槽壁面に取り付けたピエゾ式圧力センサーによって測定した圧力履歴を示す。ピーク圧力は水中のセンサで約 7 及び 5MPa、壁面のセンサで約 3.5 及び 4.5MPa を記録した。ただし、壁面については反射境界であるため圧力が媒質中の 2 倍になることに注意が必要である。圧力パルスの時間幅は 5~10ms だった。

図の横軸に示された時刻は、データレコーダのトリガリングからの経過時刻であり、共通の時間軸である。これら 4 つの圧力センサーは、水中で水単相の領域に置かれており、これらの間の圧力波の伝播は非常に短時間(水槽中心から壁面まで 0.28ms)に起こるので、位置による時刻のズレはほとんど見られない。

気相中の圧力履歴は、ALPHA 容器の天井に下向き取り付けた圧力センサで測定した。図 3.7 は、そのうち水面中心からの距離 2.25m の位置でピエゾ式圧力センサによって計測したデータである。この位置で圧力の立ち上りは 392ms で観測されており、水中での圧力立ち上り時刻 386ms から 6ms 経過している。室温(293K)における音速約 340m/s で伝播した場合の所要時間 6.6ms とほぼ一致している。加圧の大きさはノイズのため明瞭でないが、5kPa 程度の加圧が 20ms 程度にわたって持続しており、その後、時刻 415ms でセンサ又はリード線の破損により異常信号が生じている。

3.2 SSE7

デジタルビデオにより撮影した画像を図 3.8 に示す。水槽壁面のグリッド間隔は 100mm である。粗混合過程の様相は SSE6 と同様であり、水面上昇は水槽の断面積が小さいため SSE6 より大きく約 32mm だった。トリガリングも SSE6 と同様に溶融物が水槽の底に到達した時に生じ、衝撃波及び相互作用領域は上方に伝播した。

本実験で用いた水槽は金属製フレームのないものだったので、完全に破損して飛散した。

以下に示す圧力データを取得したセンサー類の詳細な位置を、図 3.9 に示す。

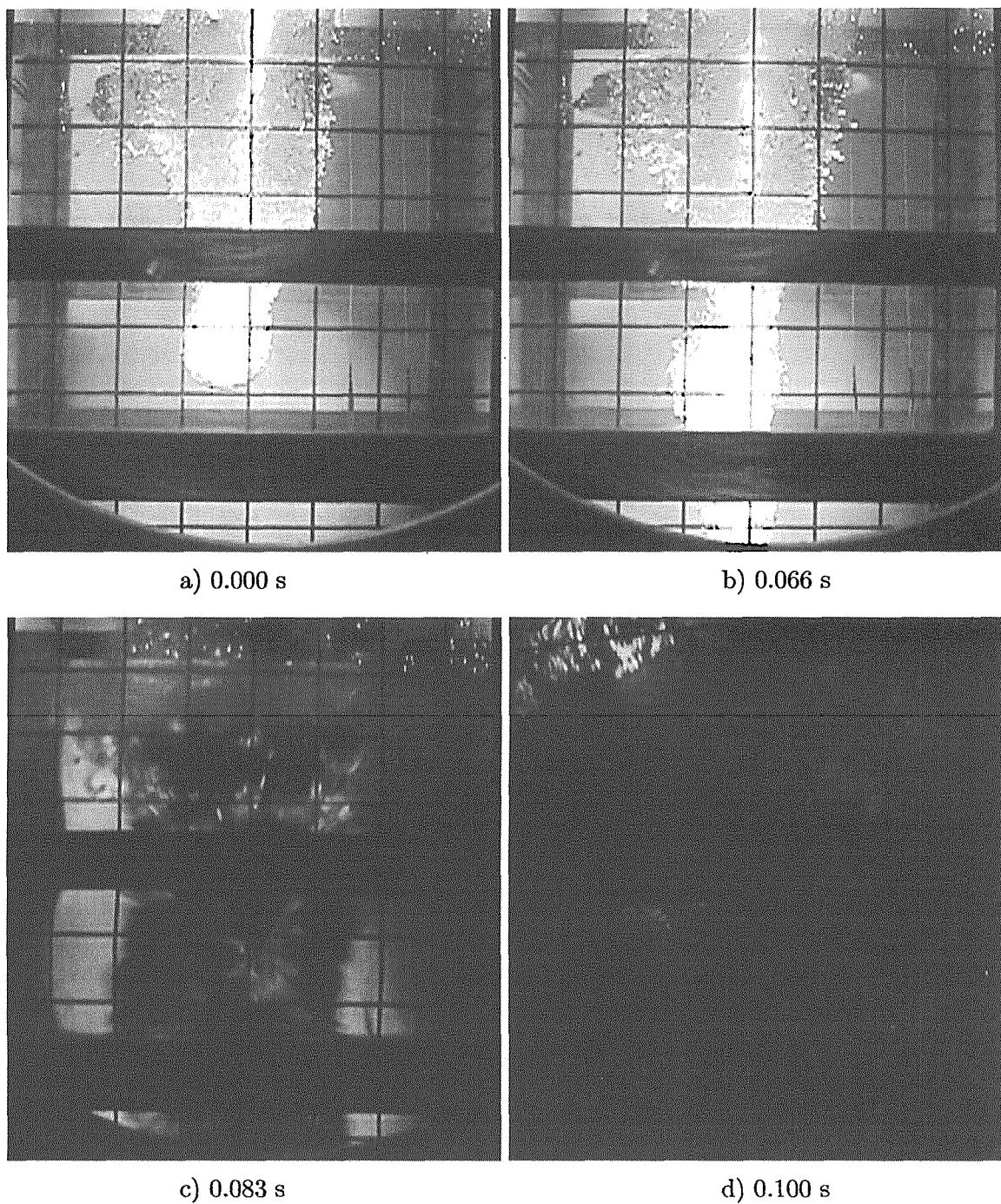


図 3.1: SSE6 実験で見られた水蒸気爆発 (デジタルビデオ 60field/s、シャッター速度 1/2000 s)：溶融物が水槽の底に敷かれたステンレス板に接触した際にトリガリングが生じ、衝撃波及び相互作用領域が上方に伝播した。

This is a blank page.

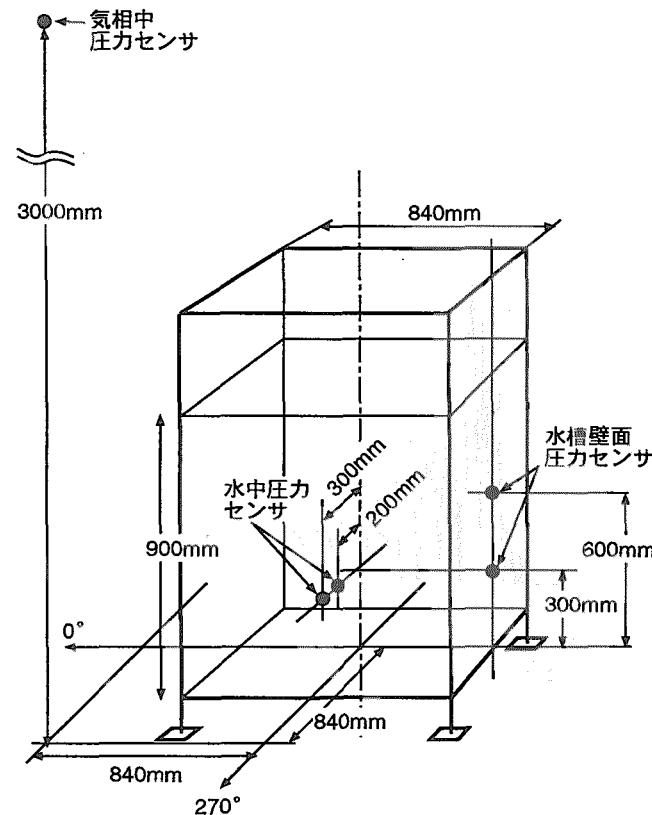


図 3.2: SSE6 実験における圧力計測位置

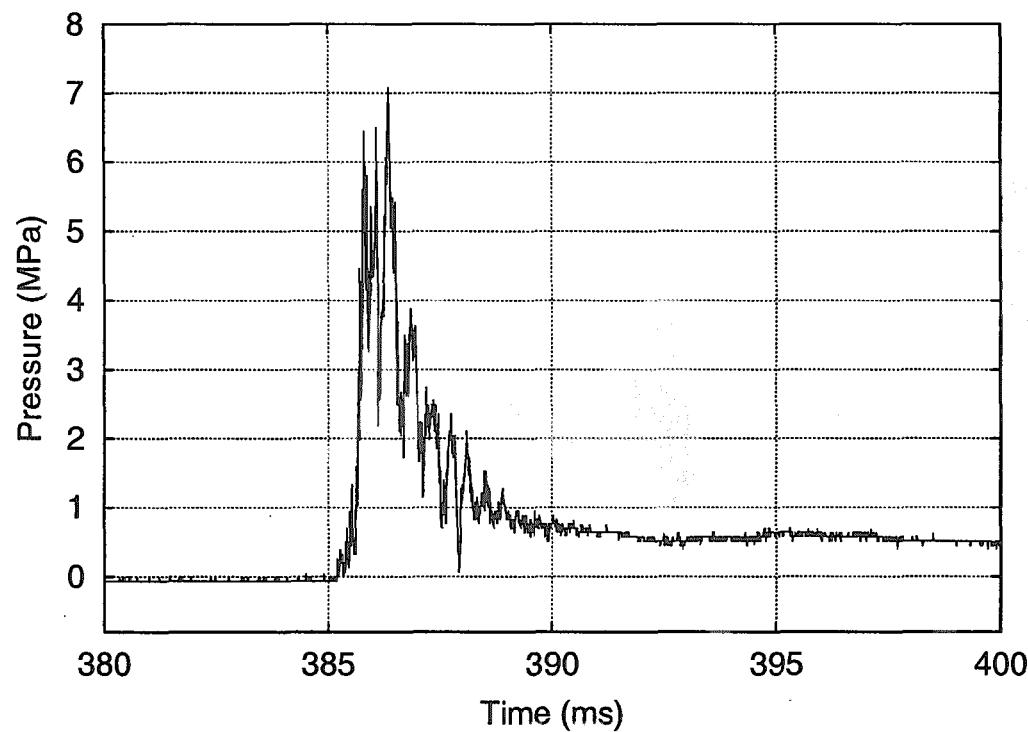


図 3.3: SSE6 実験における水中の圧力履歴 (中心軸から 200mm、底からの高さ 300mm)

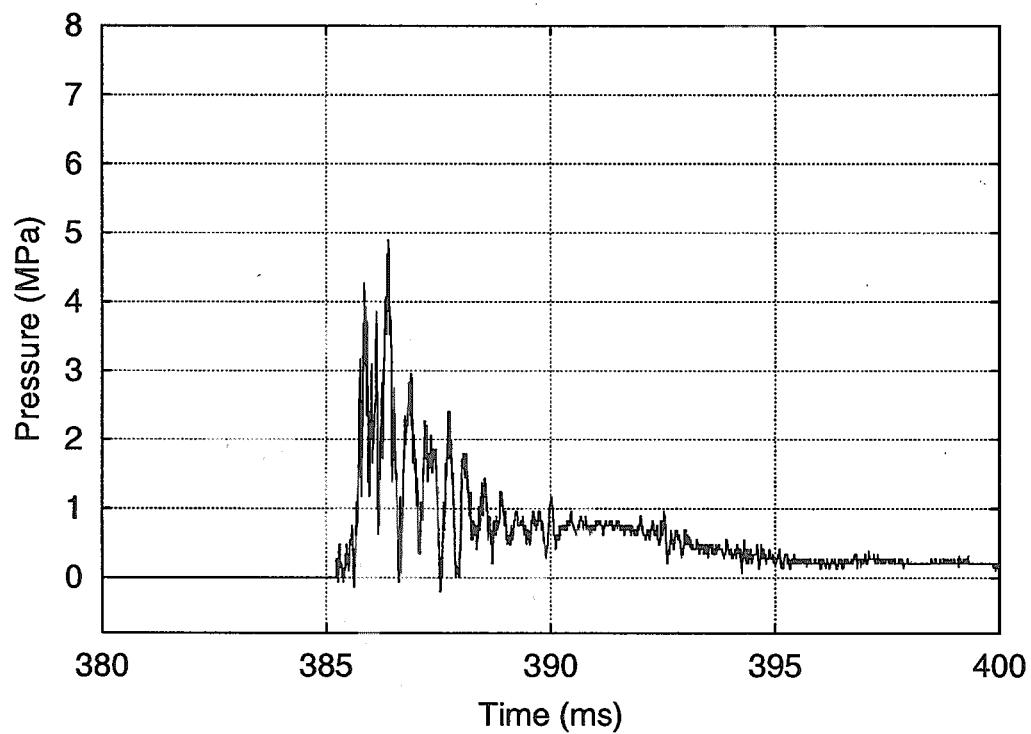


図 3.4: SSE6 実験における水中の圧力履歴 (中心軸から 300mm、底からの高さ 300mm)

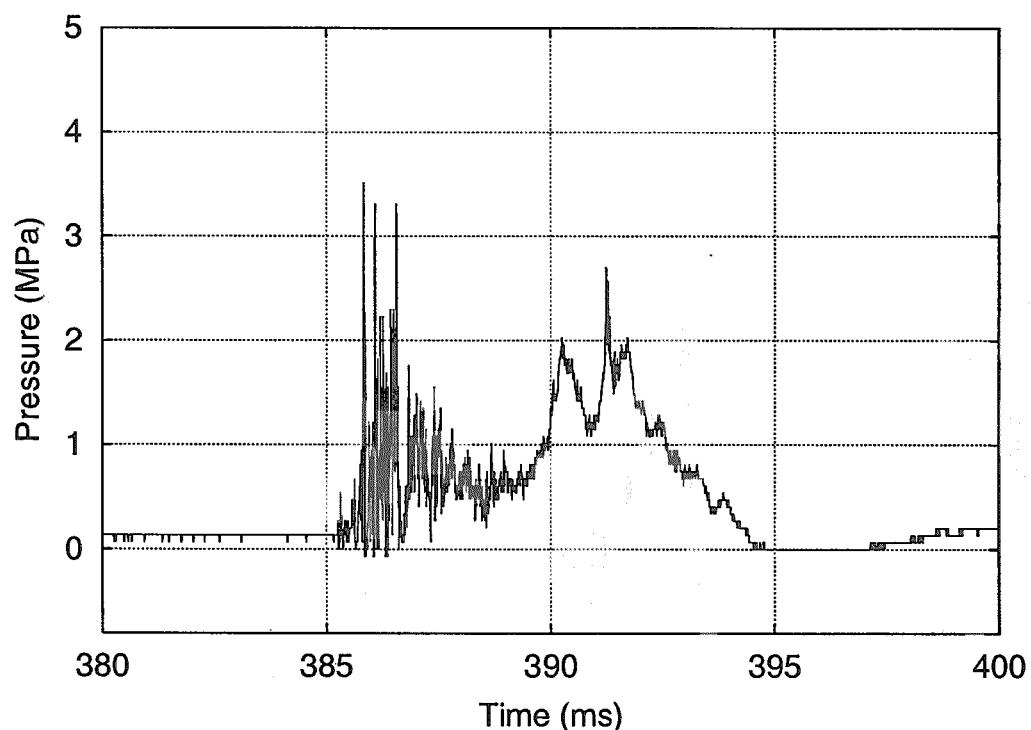


図 3.5: SSE6 実験における水槽壁面の圧力履歴 (底からの高さ 300mm)

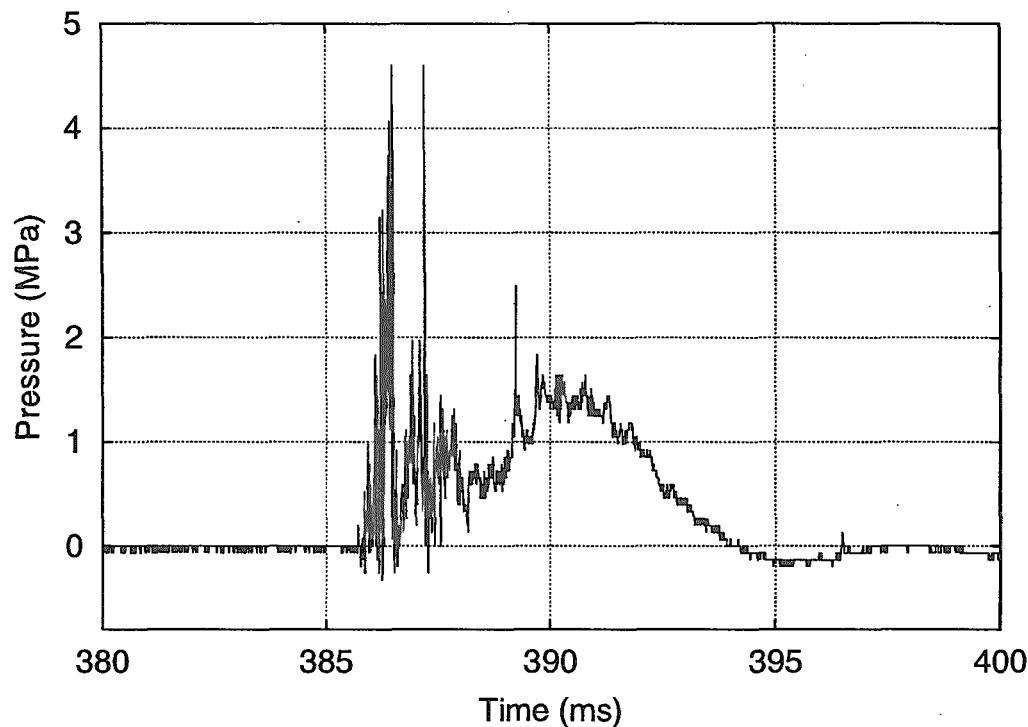


図 3.6: SSE6 実験における水槽壁面の圧力履歴 (底からの高さ 600mm)

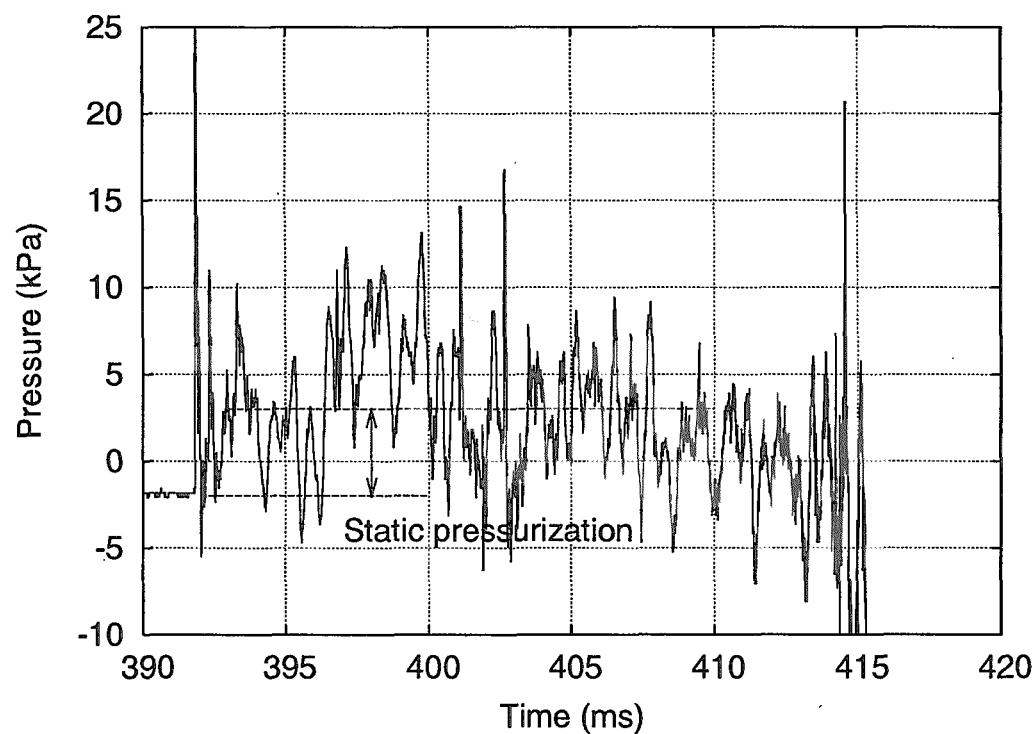


図 3.7: SSE6 実験における気相中の圧力履歴 (ALPHA 容器天井)

This is a blank page.

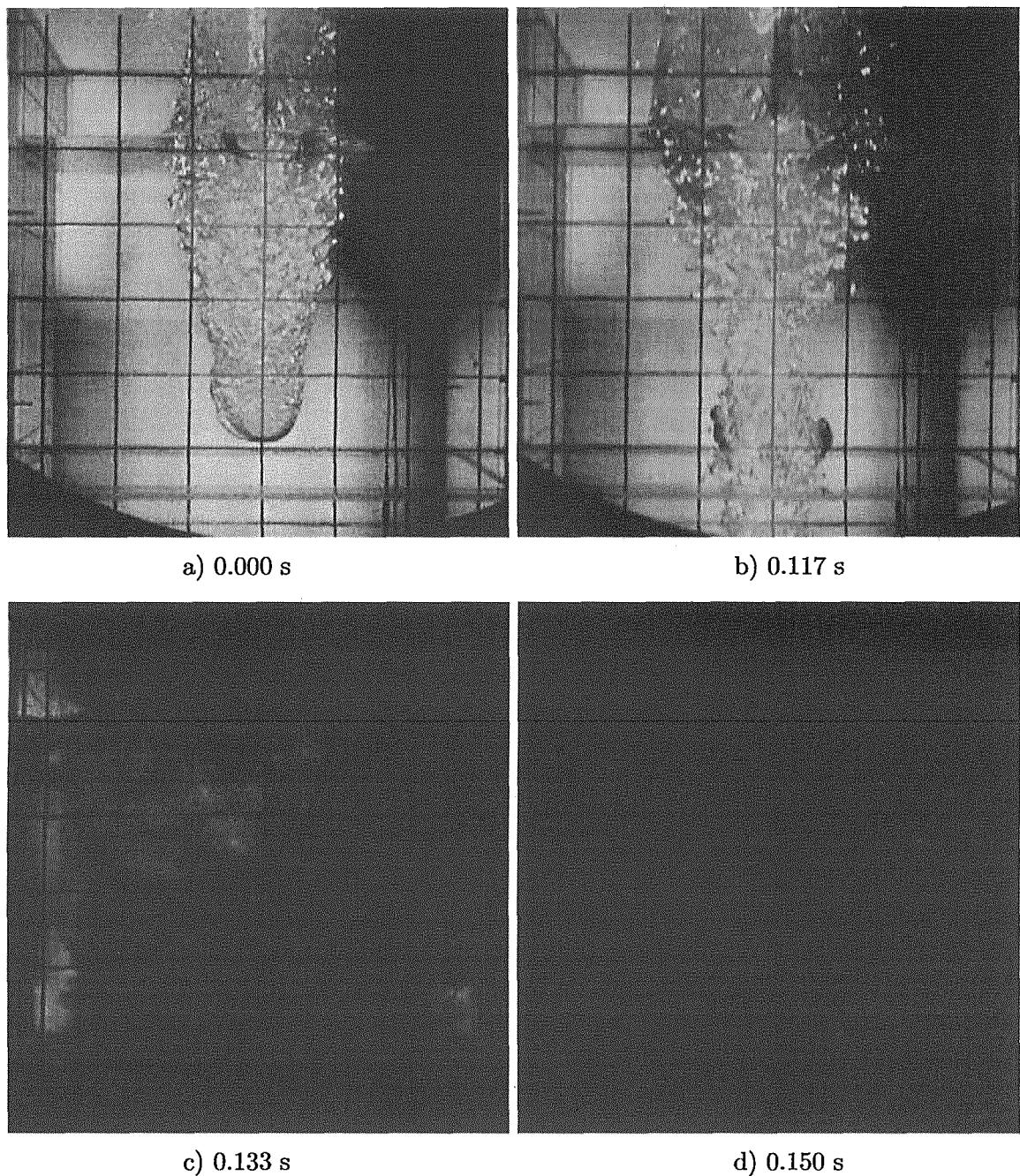


図 3.8: SSE7 実験で見られた水蒸気爆発 (デジタルビデオ 60field/s、シャッター速度 1/2000 s) : 溶融物が水槽の底に敷かれたステンレス板に接触した際にトリガリングが生じ、衝撃波及び相互作用領域が上方に伝播した。

This is a blank page.

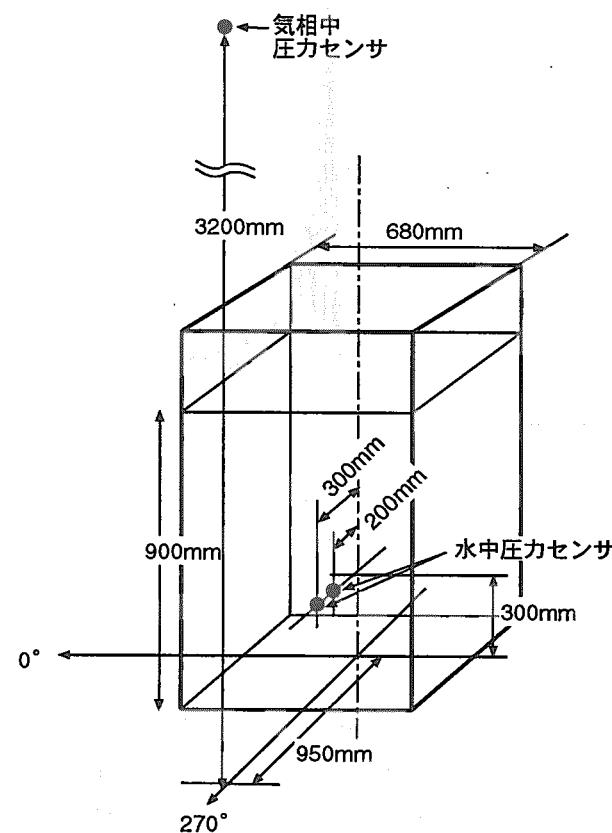


図 3.9: SSE7 実験における圧力計測位置

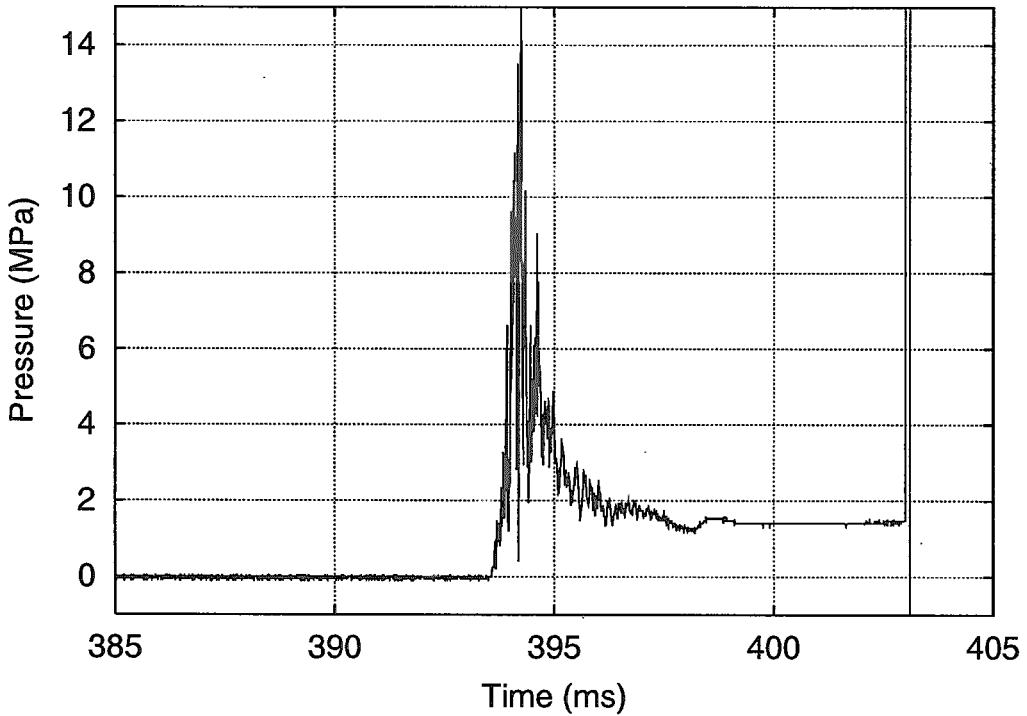


図 3.10: SSE7 実験における水中の圧力履歴 (中心軸から 200mm、底からの高さ 300mm)

水中の圧力履歴を図 3.10 及び 3.11 に、気相中の圧力履歴を図 3.12 に示す。本実験の水中でのピーク圧力は SSE6 より大きく、中心から 200mm で 15MPa、300mm で 7.5MPa だった。気相の圧縮はノイズのため不確かさが ±100% 程度あり明瞭でないが、約 6kPa で SSE6 と同程度だった。

3.3 エネルギー変換率

水蒸気爆発による熱から機械的エネルギーへの変換率を評価する場合、生じた現象のいろいろな側面から評価する方法が考えられる。ここでは、ALPHA 容器の気相の圧縮仕事、飛散した水塊の運動エネルギー、水中の力積による水塊の運動エネルギー、水槽及び水槽のフレームの変形に要した仕事について評価を試みた。

気相の圧縮 式 3.1 により、気相部の圧縮に要した仕事を求めた。

$$W_c = \frac{P_i V_i}{\gamma - 1} \left\{ \left(\frac{P_m}{P_i} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right\} \quad (3.1)$$

ここで、 P_i 、 V_i 、 P_m 及び γ は、それぞれ ALPHA 容器内の初期圧力、容積、圧縮時の圧力及び空気比熱比である。この方法は Farawila ら [13] により米国サンディア国立研究所の FITS 実験におけるエネルギー変換率評価法として提案されたものであり、従来の ALPHA 実験 [1] においても使用している。

本実験の気相の加圧の測定結果は、図 3.7 及び 3.12 に見られる通りノイズのため明瞭ではないが、最初の鋭いピークに続く数 ms～10ms に及ぶ加圧が ALPHA 容器の気相部全体の圧縮を表していると考えられる。SSE6、SSE7 各々、図から読みとれる値は 5kPa、6kPa だが不確かさが ±100% 程

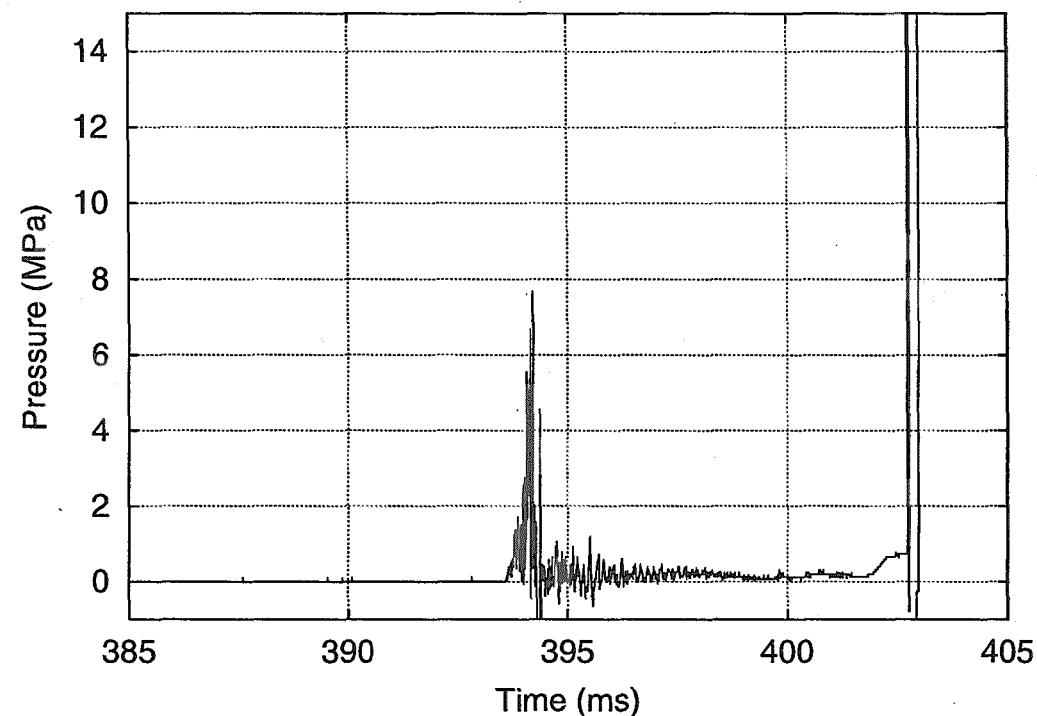


図 3.11: SSE7 実験における水中の圧力履歴(中心軸から 300mm、底からの高さ 300mm)

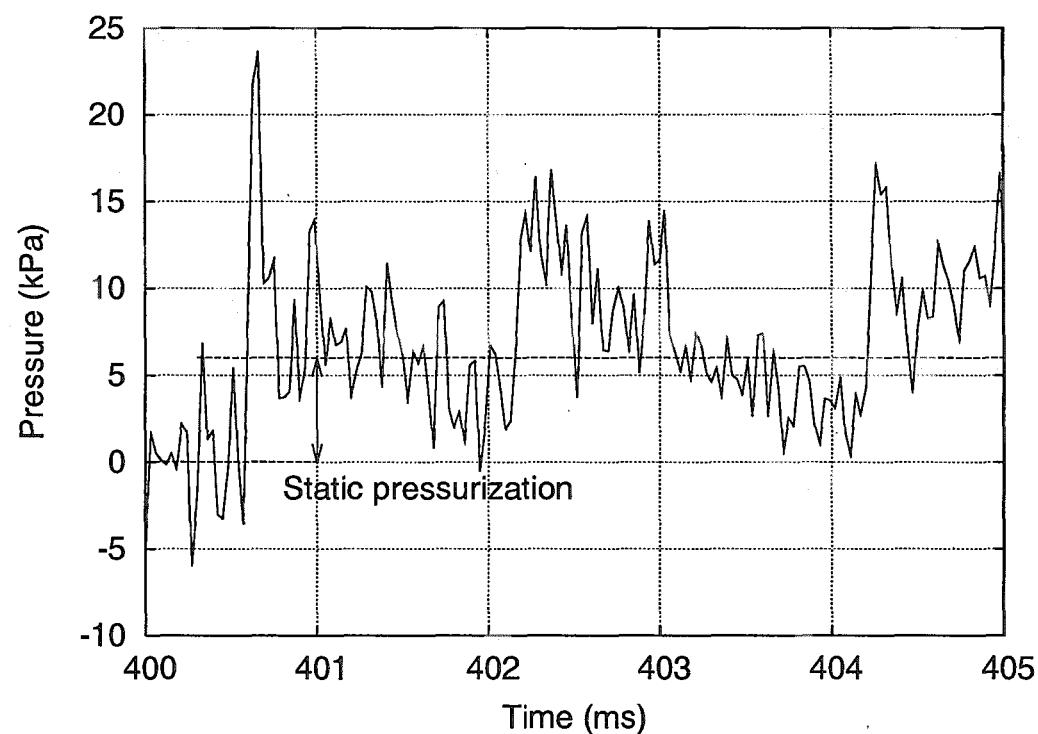


図 3.12: SSE7 実験における気相中の圧力履歴(ALPHA 容器天井)

度ある。ALPHA 容器の容積 50m^3 、空気の比熱比 1.40 を用い、 $(P_m/P_i) = 1.0 \sim 1.10$ とすると、仕事は $0 \sim 350\text{kJ}$ となる。

飛散した水塊の運動エネルギー SSE6、SSE7 共に、ALPHA 容器天井に取り付けた極細シース熱電対及び圧力センサに、飛散物の衝突によると考えられる異常信号が見られた。この異常信号が生じた時刻と水中での圧力立上り時刻の差が、飛散物の到達に要した時間であるとして、その速度を求めるとき、SSE6 では $34 \sim 78\text{m/s}$ 、SSE7 では $58 \sim 141\text{m/s}$ という値を得た。水槽の水が全てこの速度で飛散したと仮定すると、水の重量は SSE6 では 635kg 、SSE7 では 416kg だから、運動エネルギーは SSE6 では $0.37 \sim 1.9\text{MJ}$ 、SSE7 では $0.70 \sim 4.1\text{MJ}$ を得る。

ただし、実際にはこの方法で用いた水塊の速度は熱電対のある方向、つまり水槽壁などの拘束のない上方へ飛散したものの中でも最速の値であり、より小さな速度をもつ水塊の量が多いはずである。つまり、運動エネルギー評価に用いる質量または速度を過大評価している可能性が高い。運動エネルギーは $(\text{速度})^2$ に比例するため、速度の過大評価は運動エネルギーの非常に大きな過大評価の原因となる。

水中の力積から求めた水塊の運動エネルギー 水中で得られた圧力履歴(図 3.3 及び 3.10)から、水塊に与えられた運動エネルギーを評価することを試みた。図 3.1 の写真から分かるように、水槽中心軸に沿って形成された粗混合領域が伝播過程の後に高圧となり、膨張して周囲の水を加速している。このときの仕事を、水槽の中心軸近く(水中)で計測された圧力履歴から求めるという方法を用いた。

図 3.13 に評価のための系の単純化モデルを示す。矩形水槽の水を、等しい断面積を持つ円柱形の水塊として扱う。この円柱の半径を R とし、高さ L は水位に等しいものとする。円柱の内部に、圧力履歴が既知である水中の圧力センサ位置 r_0 を半径とする円筒状の検査面を考える。この円筒の内側から円筒面に加わった力積により、円筒の外側の水塊が外向きの速度を得るが、この速度は運動量保存則から求められる。これを用いて円筒の外側の水塊の運動エネルギーが求められる。なお、実験において中心軸に最も近い圧力測定位置 0.2m を r_0 とすると、その外部の水の質量は内部の水の質量よりもずっと大きいので、外部の水塊の運動エネルギーは全体の運動エネルギーに近いと考えられる。

計算法は以下の通りである。まず、 r_0 の位置における圧力履歴(図 3.3 及び図 3.10)を時間積分することにより、単位面積あたりの力積 I を求めておく。力積により加速された後の r_0 の位置の速度を v_0 とすると、その外側の水柱内での速度分布は連続の式より以下で与えられる。ただし、水柱内では非圧縮とする。

$$v = \frac{r_0}{r} v_0 \quad (3.2)$$

これを用いて、水柱の全運動量 M は、

$$M = \int_{r_0}^R \rho v L 2\pi r dr = 2\pi \rho L v_0 r_0 (R - r_0) \quad (3.3)$$

となる。ただし ρ は水の密度である。力積と運動量が等しいことから、

$$2\pi r_0 L I = M \quad (3.4)$$

これより v_0 が求められる。

$$v_0 = \frac{I}{\rho(R - r_0)} \quad (3.5)$$

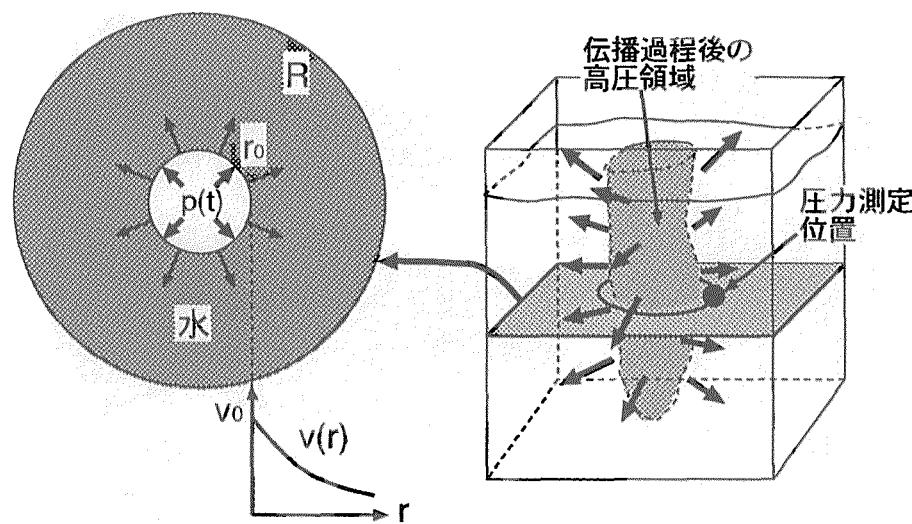


図 3.13: 運動エネルギー評価のための系の単純化モデルの概念

表 3.1: SSE6、SSE7 実験の中心軸から 200mm における圧力履歴を用いた運動エネルギー評価結果

	水体積 (m ³)	R (m)	I (Pa.s)	v ₀ (m/s)	K _e (kJ)
SSE6	0.635	0.474	6300	23.0	103
SSE7	0.416	0.384	7500	40.8	245

これを用いて、水柱の運動エネルギー K_e が以下の式により求められる。

$$K_e = \int_{r_0}^R \rho v^2 L 2\pi r dr = 2\pi \rho L v_0^2 r_0^2 \log \frac{R}{r_0} \quad (3.6)$$

SSE6 及び SSE7 実験の、水槽中心軸より 200mm の位置で測定された圧力履歴を用いて、運動エネルギーを評価した結果を表 3.1 に示す。ただし、圧力データの時間積分は、SSE6(図 3.3) で 385 ~ 395ms、SSE7 (図 3.10) で 393~400ms で行った。運動エネルギーの値は各々 103、245kJ となり、上記の気相圧縮による方法と同じオーダーの値となった。

水槽の変形 (壁の圧力負荷と変位から) SSE6 で使用した鋼製フレームつきの水槽は、実験後、図 3.14 のように変形していた。変形の顕著だった水槽の腹の部分の水平な 2 筋の梁、計 8 本について、各々の中点での変位量を測定し、上下各々 4 本について平均すると、上で 57mm、下で 95mm であった。壁面の平均変位を評価するため、図 3.15 に示すように、水槽の各壁面の 4 辺では変形がないとして、壁面の中心線及び変形した梁の中心線を、3 点を通る二次曲線で近似した。これにより壁面の平均変位を求めるとき 55mm であった。

一方、壁面での圧力データ (図 3.5 及び 3.6) を時間積分すると、底から 300mm 及び 600mm の位置のデータから共に単位面積あたりの力積として約 3500Pa·s が得られた。これを加圧時間 7ms で除して加圧時間内の平均圧力を求めると、0.5MPa となる。

壁の変形に要した仕事は平均圧力、壁面の面積、平均変位の積として求められ、その値は 84kJ となる。

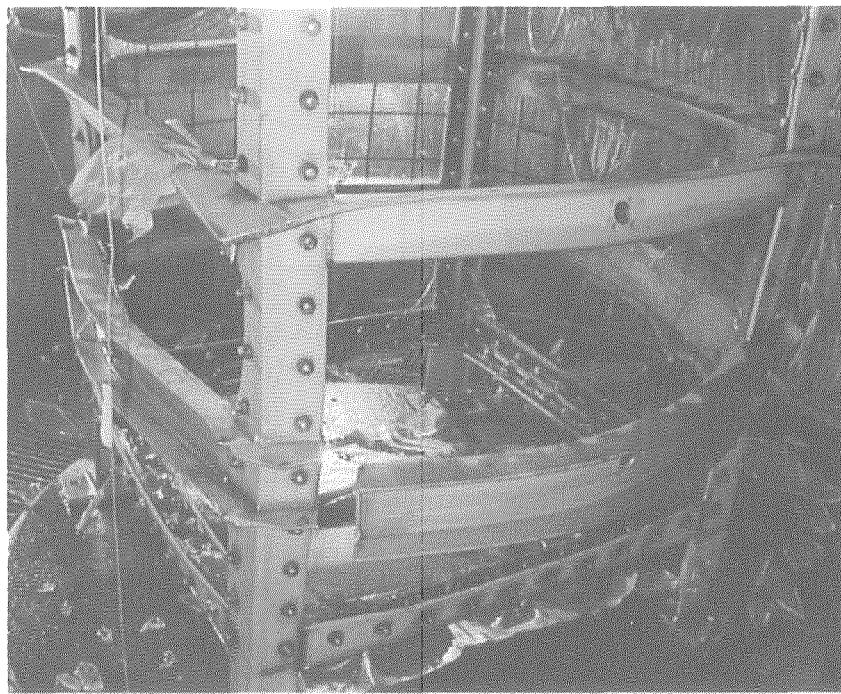


図 3.14: SSE6 実験後の水槽フレームの変形と破損の状況

水槽の変形 (フレームの塑性変形荷重と変位から) 力の評価にフレームの塑性変形に要する荷重を用いる方法でも、評価を試みた。両端を固定支持された梁が塑性崩壊(全断面が降伏した状態)に至る荷重は、

$$W_p = 16 \frac{\sigma_s Z_p}{l} \quad (3.7)$$

で与えられる [14]。ただし、 σ_s 、 Z_p 、 l は各々、降伏応力、塑性断面係数及び梁の長さである。降伏応力としてフレーム材料であるステンレス鋼 (JIS-SUS304) の 0.2%耐力、227MN/m²[15] を用いた。塑性断面係数は上下の梁について各々 2.69×10^{-5} Nm 及び 1.36×10^{-5} Nm と求められ、長さ 0.84m だから、崩壊荷重は各々 82.1kN 及び 41.4kN となる。上下の梁の変形後の形状を 2 次曲線で近似して平均変位を求めると各々 38mm、63mm となる。仕事は荷重と平均変位の積として求められ、上下各々 4 辺について積算すると 23kJ となる。

以上の検討で得られた初期保有熱量から運動エネルギー及び仕事への変換量を表 3.2 にまとめて示す。

これらの評価のうちで、飛散物の運動エネルギーによる評価は初期熱エネルギーの数十%以上と非常に大きな値となった。これは、化学反応によるエネルギー放出が初期熱エネルギーの数倍あれば物理的に不可能な値ではないが、むしろ上述したように飛散物の質量及び速度の過大評価に起因する可能性が高い。

従来の ALPHA 実験で用いてきた気相圧縮による評価法は、本実験では気相の圧力計測のノイズが大きいため値の不確かさが大きいが、オーダーとしては従来の結果 [1] と同等となっている。

本報告で新たに試みた、水中の圧力センサの乗る円筒形の検査面への力積から水塊の運動エネルギーを評価する方法は、ノイズの少ない水中の圧力データを時間積分した値を用いていいるので、信頼度が高いと考えられる。また、本実験の場合、ビデオによる観察から円筒形の水塊の外向き加速という単純化モデルもかなり妥当であると考えられる。ただし、実際には水槽壁の強度が存

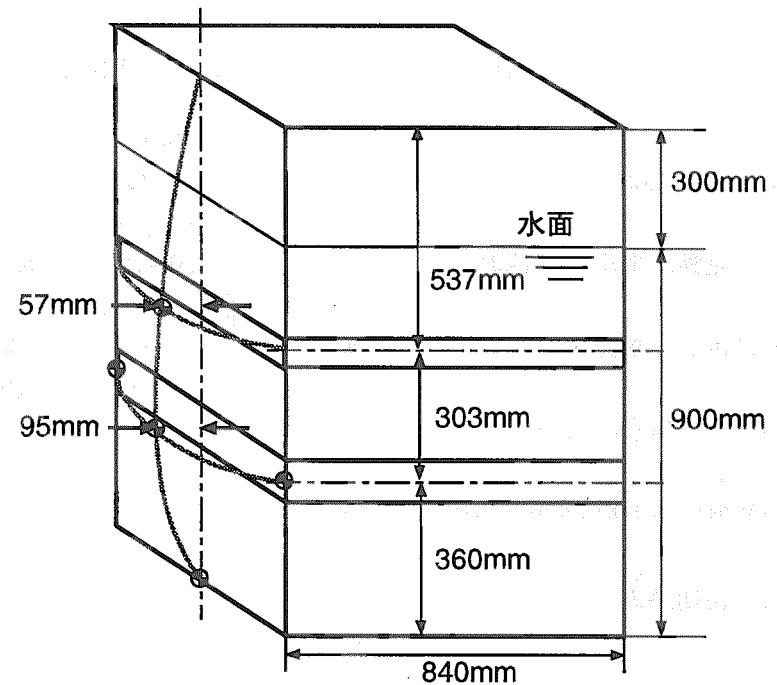


図 3.15: SSE6 実験水槽壁面の平均変位の評価

在することと、水塊の運動は水平方向だけではないこと、検査面として考えた半径 0.2m の円筒面の内側の水の運動については考えていないことから生じる誤差が存在するはずである。

容器の変形に要する仕事の 2 種類の評価のうち、壁面の変位にかかる仕事は、水中の力積からの水塊運動エネルギー評価と近い値となっている。水槽のフレーム変形に要した仕事は、これらより小さい値となっている。水蒸気爆発による高圧部が水塊を加速し、この水塊が壁面及びフレームを変形させ、さらに壁面破損後に飛散したと考えれば、壁面変位の仕事にはフレーム変形の仕事が含まれ、さらにこれらは水槽内で水塊が得た運動エネルギーの一部に該当する、というような相互関係が存在すると考えられる。

以上の評価結果のうち、水蒸気爆発の結果発生した機械的エネルギーの総量を代表する量として、もっとも確からしい値としては、水中の力積から水塊の運動エネルギーを評価したものと考えられ、それによるエネルギー変換率の値は SSE6、SSE7 で各々 3.9%、9.8% である。気相圧縮仕事から得られた評価値の不確かさの上端であるエネルギー変換量 350kJ 程度、エネルギー変換率 14% 程度までは、不確かさの範囲と考えることにする。

3.4 デブリ粒径分布

SSE6 及び SSE7 実験で水蒸気爆発の結果得られた、シリコンの粒子状固化物(デブリ)をふるいで分粒し、粒径分布を調べた。回収されたデブリには水槽の破片等の不純物が混入しており、これらは比較的サイズが大きいので、最初に 2mm 及び 1mm のふるいでサイズの大きなものを分け、不純物を取り除いた。その後、残ったデブリから 200g ずつのサンプルを 10 回採り、超音波分粒器で 100~300Hz の振動を 75 分間加えて分粒した。質量収支の状況を表 3.3 に示す。

デブリの粒径分布を図 3.16 に示す。比較のためにテルミット溶融物 20kg をサブクールの大きい水プールに落下させた実験、STX17、STX18、STX19、STX21 及び STX20 のデータ [2] を併せ

表 3.2: SSE6 及び SSE7 実験におけるエネルギー変換量評価値のまとめ

評価法	SSE6	SSE7
気相圧縮仕事 (kJ)	0~350 (0~13)	0~350 (0~14)
飛散物の運動エネルギー (kJ)	370~1900 (14~71)	700~4100 (28~163)
水中の力積から水塊運動エネルギー評価 (kJ)	103 (3.9)	245 (9.8)
水槽の変形仕事 (壁面荷重による) (kJ)	84 (3.1)	-
水槽の変形仕事 (梁の塑性変形荷重による) (kJ)	23 (0.86)	-
溶融物の初期熱エネルギー ¹⁾ (kJ)	2670	2510

1) 化学反応による熱は含まない。

() 内の数値はエネルギー変換率 (%)

表 3.3: SSE6 及び SSE7 実験におけるシリコンの質量収支

実験 番号	SSE6	SSE7
るっぽ内残量 (g)	90.24	59.03
回収されたデブリ (g)	3923.41	3841.02
2mm 以上のデブリ (g)	21.50	1.82
1mm 以上 2mm 未満のデブリ (g)	52.63	8.56
超音波分粒したデブリ (g)	1981.84	1977.55
未分粒デブリ (g)	1867.44	1853.08
(るっぽへのシリコン装荷量 4kg)		

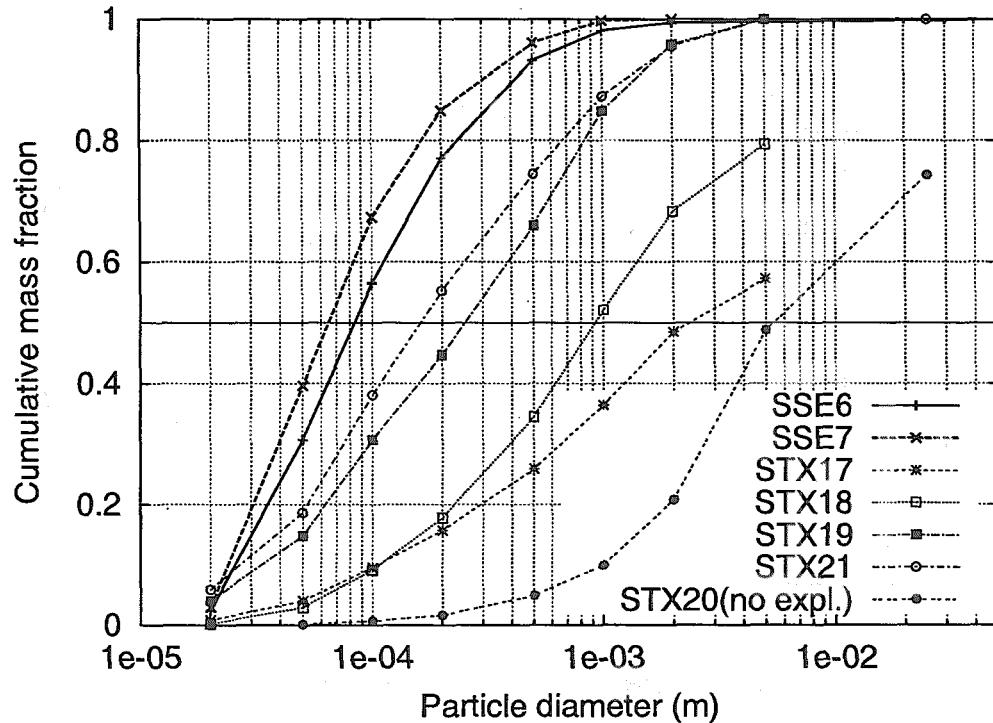


図 3.16: SSE6 及び SSE7 実験のデブリ粒径分布: 比較のためテルミット溶融物を用いた実験 [2] のデータ (STX17、18、19、21、20) を示した。STX20 は水蒸気爆発が起こらなかった場合のデータである。本実験で得られたデブリは非常に粒径が小さい。

て示した。このうち STX19、20、21 は溶融物を水面付近で金網により強制的に分裂させた実験であり、STX20 では水蒸気爆発が起こらなかった。STX17 及び 18 では、質量中央径が 1mm 程度となり、水蒸気爆発が起こらなければほとんど存在しない 0.1mm 以下のデブリが生成している。溶融物を強制分裂させた場合、水蒸気爆発が起これば (STX19 及び 21) 細粒化はさらに進み、質量中央径は 0.2mm 程度、0.1mm 以下のデブリが 30% を超えるようになる。本実験ではデブリの質量中央径が SSE6 で 85 μm 、SSE7 で 65 μm と両者とも 0.1mm 以下となっており、これまでの実験と比較して非常に細粒化が進んでいる。

細粒化が進んでいることは伝熱面積が効果的に拡大したことを意味し、一般にデブリ粒子径が小さいほどエネルギー変換率が高い傾向がある。SSE6 及び SSE7 実験についても、デブリ粒子径とエネルギー変換率の相関を調べ、テルミット溶融物を用いた実験とも比較した。

図 3.17 に、水蒸気爆発の結果生成されたデブリの質量中央径とエネルギー変換率の相関を示す。SSE6 及び 7 の結果は、おおまかに見れば、これまでのテルミット溶融物を用いた実験結果 (ALPHA-STX シリーズ [1]) が示す傾向の延長線上 (左端) に位置することが分かる。なお、図中の STX 実験のデータは ALPHA 容器の気相圧縮から求められた値であるが、本実験と比較して気相中の圧力履歴データのノイズは小さく、また温度履歴からの評価とほぼ一致することも確認されている。

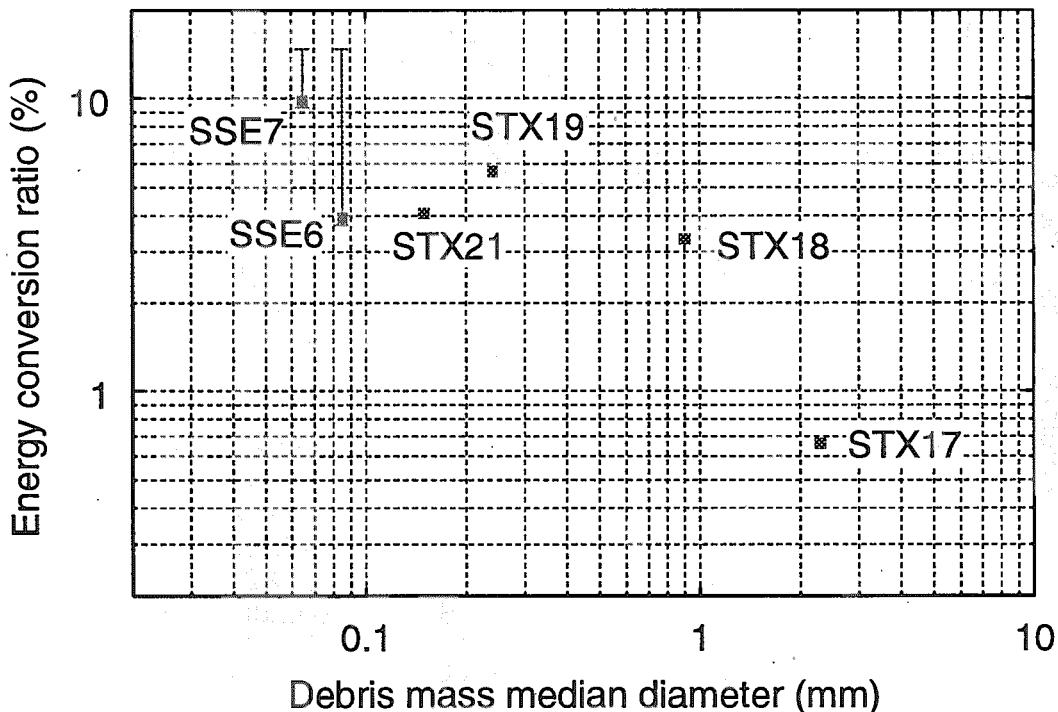


図 3.17: 溶融物の細粒化の程度とエネルギー変換率の相関

3.5 酸化反応の影響

本実験では ALPHA 容器が大容積で密閉できない構造であるため、気相の分析からの酸化反応の有無を調べることができなかった。そこで、エネルギー変換率の値とシリコンの酸化による質量増加、および、デブリ表面の酸化皮膜に関する分析から検討した。

エネルギー変換率の値は、水中の力積から水塊の運動エネルギーを求める方法による評価では、酸化反応熱を考慮しない初期保有熱に対して 3.9~9.8% となった。(3.3 参照) この値は従来のテルミット溶融物を使用した実験 [1] とほぼ同等であり、酸化を考慮しなければ物理的に説明できないほど大きな値ではない。しかし、気相圧縮からの評価値は不確かさの範囲の上端で 14% であり、従来と比較するとかなり大きい。酸化反応の寄与があった可能性は否定できない。

次に、質量増加については、酸化反応



により生成する二酸化ケイ素は元のシリコンと比較して 2.14 倍の質量をもつ。したがって、例えば 5% のシリコンが酸化されても総質量は 5.7% 増加し、充分検出できるはずである。ところが、実験後回収されたデブリの質量は装荷されたシリコンと比べて有意な増加が認められなかった。ただし、非常に微細な粉末となって ALPHA 容器外に排出されてしまい、回収できなかったもの的存在も否定できない。

そこで、酸化反応の程度についてさらに詳細に調べるため、デブリ表面の酸化皮膜に関する分析を行った。まず、SSE6 及び SSE7 実験で得られたデブリを樹脂に埋め込み切断したサンプルを作成し、断面の光学顕微鏡及び SEM(走査型電子顕微鏡) 観察を行い、表面に皮膜の存在を確認した。SSE6 の 2mm 以上のサンプルの SEM 写真を図 3.18 に示す。

次に、EPMA(X 線マイクロアナライザ) により、同じ試料の図 3.18 に示された位置において定性分析及び線分析を行った。定性分析では、表面皮膜の主成分はシリコンと酸素であることが確

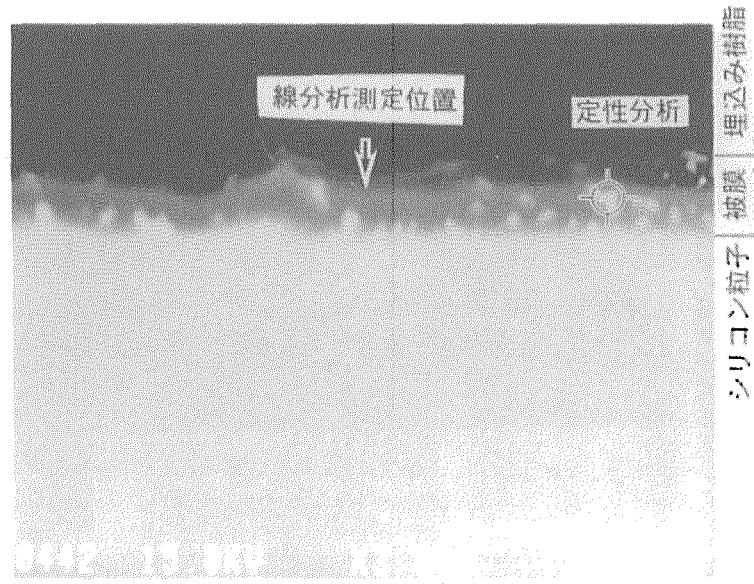


図 3.18: SSE6 実験のデブリサンプル (2mm 以上) の断面 SEM 写真: 表面に皮膜の存在が認められる。EPMA による定性分析及び線分析の位置を示す。

表 3.4: 光学顕微鏡写真によるデブリ表面皮膜厚さの評価

粒径レンジ	SSE6	SSE7
2mm 以上	3~6μm	0.8~3μm
0.5~1mm	0.8~1.6μm	3μm 以下
0.1~0.2mm	0.8μm 以下	1.6μm 以下

認され、この皮膜が酸化膜であることが確認できた。線分析の結果を図 3.19 に示す。横軸が距離、縦軸が各成分に対する強度を示す。距離 0 の位置は皮膜外側の樹脂に満たされた領域であるため炭素が多く、皮膜では酸素とシリコンが混在している。デブリの内部では酸素は少なく、シリコンのみである。酸素とシリコンの混在領域は 0.009~0.014mm 付近であり、これよりこの位置の酸化皮膜厚さは約 5μm であると判断できる。

図 3.20 は、SSE6 実験デブリサンプル (2mm 以上) の断面の光学顕微鏡写真である。光学顕微鏡においても、EPMA 線分析で測定されたのと一致する 3~6μm 程度の皮膜が見られた。他のサンプルについても同様の光学顕微鏡写真から皮膜厚さの測定を行った。その結果を表 3.4 にまとめた。厚さ測定は、各サンプルで 1~2 個の粒子につき数点で行い、その範囲を示している。SSE6 及び 7 共に、2mm 以上のサンプルでは比較的明瞭な皮膜が見られたが、粒径の小さいサンプルでは顕微鏡写真の解像度では測定の困難な像しか得られなかった。おおまかな傾向として、初期溶融物過熱度の高い SSE6 の粒径の大きいデブリでは数 μm の明瞭な酸化皮膜が見られるが、粒径の小さいものでは皮膜は薄く、また溶融物過熱度の低い SSE7 でも皮膜は薄い。この原因是、粒子温度があるしきい値より低くなると酸化層の成長が止まり、その時間は粒子の熱容量と初期温度により決まるためと推測される。

表 3.4 の結果を元に、粒子体積に対する酸化皮膜体積の割合を算出したものを表 3.5 に示す。粒径の小さいデブリは酸化皮膜厚さが薄いが、体積が小さいために皮膜の体積割合は大きくなっている。但し、粒径の小さい粒子については皮膜厚さの測定値が大きな不確かさを含むことに注意

This is a blank page.

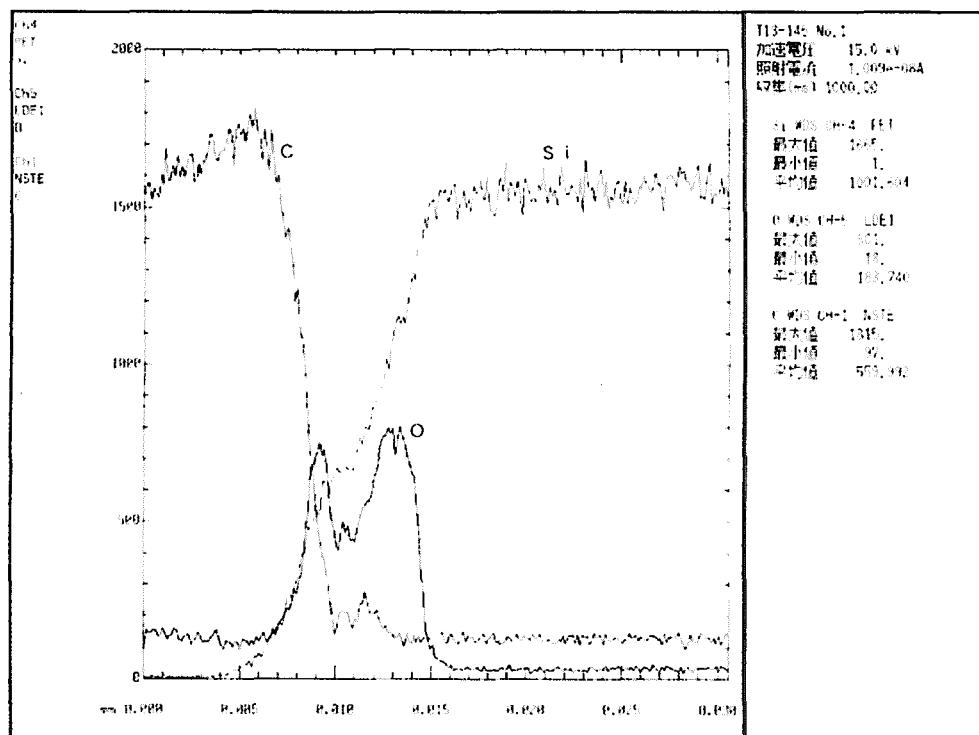


図 3.19: SSE6 実験のデブリサンプル(2mm 以上)表面皮膜の EPMA 線分析結果: 横軸が距離、縦軸が各成分に対する信号強度を示す。0.009~0.014mm 付近に O と Si の混在領域があり、酸化皮膜と判断できる。

表 3.5: 粒子体積に対する酸化皮膜体積の割合

粒径レンジ	SSE6	SSE7
2mm 以上	0.9~1.8%	0.24~0.9%
0.5~1mm	0.64~1.3%	2.4%以下
0.1~0.2mm	3.2%以下	6.4%以下

This is a blank page.

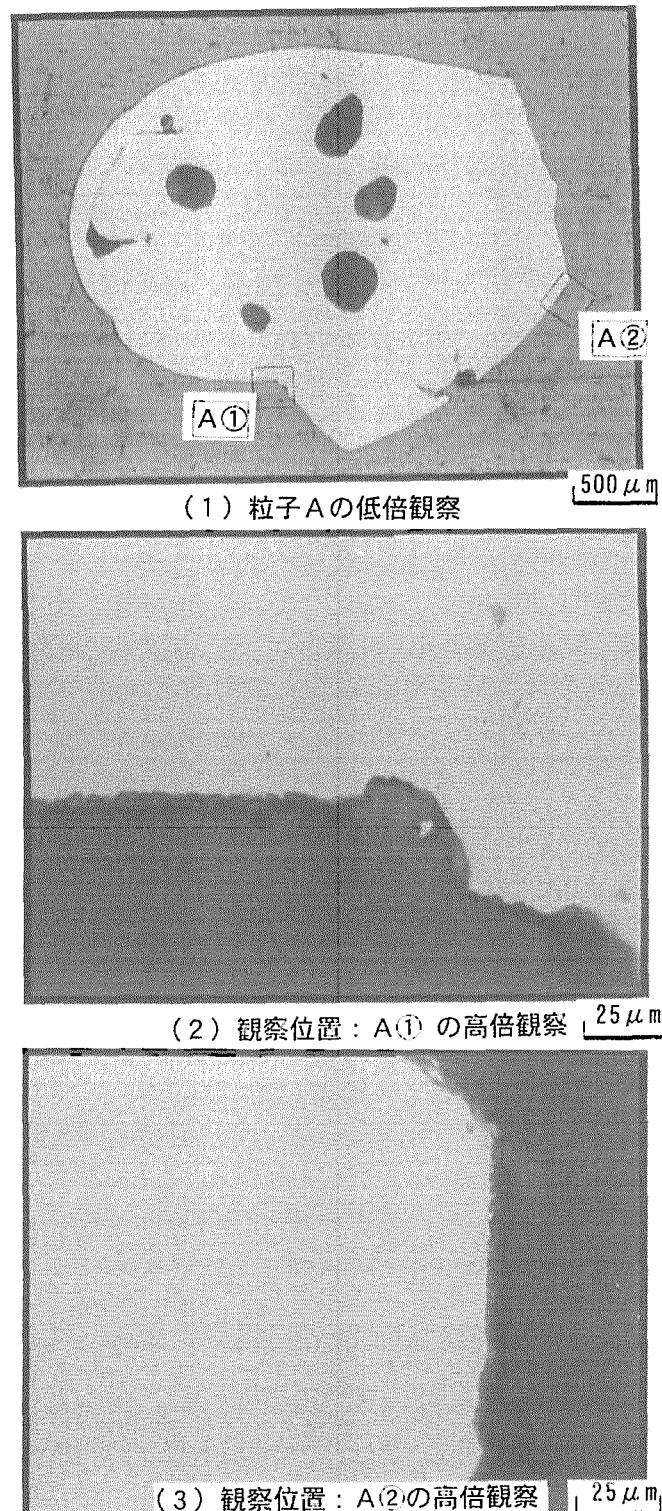


図 3.20: SSE6 実験のデブリサンプル (2mm 以上) の光学顕微鏡写真: (1) 粒子全体、内部に空洞を持つ粒子が頻繁に見られた。(2) A(1) 部分の拡大。(3) A(2) 部分の拡大。A(1)、(2) 部分ともに 3~6 μm 程度の皮膜が見られる。

This is a blank page.

が必要である。ここで分析に供したデブリ粒子は、断面観察の可能なサイズである 0.1mm 以上のものだが、デブリ粒径分布を示した図 3.16 より、実際にはシリコン質量の半分以上は 0.1mm 以下の微粒子になっており、全体の酸化率は未知である。しかし、以上の検討から、数%程度のシリコンが酸化した可能性がある。

4 結 言

シリコン 4kg を加熱溶融して過熱度約 200K 及び 50K としたものを、室温の水プール中に落下させる体系で水蒸気爆発実験を行い、以下のような結果を得た。

- 溶融物の過熱度の違いに依らず、自発的水蒸気爆発が発生した。
- トリガリングは溶融物が水槽の底に到達したときに生じ、衝撃波及び相互作用領域が上方へ伝播することが観察された。
- デブリ粒子径は、これまでに行ったテルミット溶融物の実験と比較して非常に小さく、質量中央径で 85 μm (SSE6) 及び 65 μm (SSE7) だった。
- エネルギー変換率を、水中の力積から水塊の運動エネルギーを求める方法で評価したところ、SSE6、SSE7 実験について各々 3.9%、9.8% を得た。ALPHA 容器内の気相圧縮に要した仕事からの評価はデータのノイズにより不確かさが大きかったが、その上端値までを不確かさ範囲と考えると、最大 14% 程度となる。なお、これは化学反応熱を含まない溶融物の初期熱エネルギーを分母として求めた値である。この結果は、これまでにテルミット溶融物を用いて行った実験と比較して同等からやや大きい程度であり、また、エネルギー変換率とデブリ粒子径の相関についてテルミット溶融物を用いた実験と整合性が認められた。
- 実験後回収されたデブリの質量には酸化による有意な增量が認められなかった。しかし、デブリ粒子の表面分析により最大 5 μm 程度の酸化膜が認められ、質量割合で数% のシリコンが酸化した可能性がある。

謝 辞

本研究は、日本原子力研究所と信越半導体(株)の共同研究として実施したものである。実験に係る多くの作業、ALPHA 施設の運転にあたっては、安全技術課伊藤秀雄課長、錦沢友俊氏、原子力エンジニアリング(株)野上稔、小島正弥両氏のサポートを受けた。デブリ粒子の SEM・EPMA 分析では、鋼管計測(株)の栗木良郎氏の協力及び技術的助言をいただいた。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- [1] N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, A. Hidaka, and J. Sugimoto. Phenomenological studies on melt-coolant interactions in the ALPHA program. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 369–389, 1995.
- [2] K. Moriyama, N. Yamano, Y. Maruyama, T. Kudo, and J. Sugimoto. ALPHA visual data collection STX005-025: Melt drop steam explosion experiments. Technical Report JAERI-Data/Code 99-017, Japan Atomic Energy Research Institute, 1999.
- [3] A. W. Cronenberg and R. Benz. Vapor explosion phenomena with respect to nuclear reactor safety assessment. Technical Report NUREG/CR-0245, TREE-1242, Idaho National Engineering Laboratories, 1978.
- [4] M. L. Corradini, B. J. Kim, and M. D. Oh. Vapor explosion in light water reactors: a review of theory and modeling. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 22, No. 1, pp. 1–117, 1988.
- [5] 森山清史, 山野憲洋, 丸山結, 工藤保, 杉本純. 蒸気爆発に関する実験的研究の概要. Technical Report JAERI-Review 94-010, 日本原子力研究所, 1994.
- [6] Anhar R. Antarakaswan, K. Moriyama, H.-S. Park, Y. Maruyama, Y. Yang, and J. Sugimoto. The premixing and propagation phases of fuel-coolant interactions: a review of recent experimental studies and code developments. Technical Report JAERI-Review 98-012, Japan Atomic Energy Research Institute, 1998.
- [7] 高島, 飯田. 蒸気爆発の科学—原子力安全から火山噴火まで-. 蔦華房, 1998.
- [8] Lloyd S. Nelson. Steam explosion of single drops of pure and alloyed molten aluminum. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 413–425, 1995.
- [9] D.H. Cho, D.R. Armstrong, and R.P. Anderson. Combined vapor and chemical explosions of metals and water. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 405–412, 1995.
- [10] D.H. Cho, D.R. Armstrong, and W.H. Gunther. Experiments on interactions between zirconium-containing melt and water (ZREX): hydrogen generation and chemical augmentation of energetics. In *Proc. OECD/CSNI specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions, Tokai-mura, Japan (JAERI-Conf 97-011, NEA/CSNI/R(97)26)(Part II)*, pp. 595–607, 1997.
- [11] 日本化学会（編）. 化学便覧 基礎編 改訂4版. 丸善, 1993.

- [12] 山野憲洋, 丸山結, 工藤保, 森山清史, 伊藤秀雄, 小森慶一, 園部久夫, 杉本純. 事故時格納容器
　　挙動試験 (ALPHA) 装置設計報告書. Technical Report JAERI-Tech 98-019, 日本原子力研究所,
　　1998.
- [13] Y. M. Farawila and S. I. Abdel-Khalik. On the calculation of steam explosion conversion
　　ratios from experimental data. *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 104, pp. 288–295,
　　1990.
- [14] 日本機械学会 (編). 機械工学便覧, pp. A4-38-39. 丸善, 1987.
- [15] 幡野佐一. 工業材料便覧. 日刊工業新聞社, 1981.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J(15 °C)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-11}		1	100
	3.7×10^{10}	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

溶融シリコンの水蒸気焼成に関する研究



古紙配合率100%
白色率70%再生紙を使用しています